基于虚拟调试技术的加速器真空监控系统设计

李继刚[1,2]，杨锋[2]，陈又新[2]，曹世权[1,*]，陆彦宏[2,3]，
刘海涛[2]，李姣赛[2]
（1 西北师范大学，兰州 730070；
2 中国科学院近代物理研究所，兰州 730000；
3 中国科学院大学，北京，100049）

摘要：加速器真空监控系统是加速器控制系统中一个重要的子系统，对于维持加速器的正常运行起着重要作用。传统大型控制系统的设计开发及研制过程高度依赖物理实体，整个系统的功能测试、性能验证全部集中在项目后期，导致控制系统开发周期较长、风险较高、后期现场调试时间紧张。为此，引入工业虚拟调试及虚拟机等技术，搭建了加速器真空监控系统的全层级虚拟仿真调试平台，在开发的早期阶段开始进行加速器空监控系统的并行协作式开发，全层级虚拟化调试及逻辑预演，最终通过现场配置将调试成果应用到现场，显著缩短现场调试的时间，降低对设备损耗、调试风险，提高项目的实施效率和工程设计的可靠性。

关键词：虚拟调试；加速器真空监控系统；虚拟仿真平台
中图分类号：TL503.7,TP29 **文献标志码**：A

Design of accelerator vacuum monitoring system based on virtual commissioning technology

Li Jigang[1,2], Yang Feng[2], Chen Youxin[2], Cao Shiquan[1], Lu Yanhong[2,3],
Liu Haitao[2], Li Jiaosai[2]

(1 Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;
2 Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The accelerator vacuum monitoring system is an important subsystem in the accelerator control system, which plays an important role in maintaining the normal operation of the accelerator. The design, development and development process of traditional large-scale control systems are highly dependent on physical entities, and the functional testing and performance verification of the whole system are all concentrated in the late stage of the project, resulting in a long development cycle of the control system, higher risks, and a tight time for late field debugging. To this end, industrial virtual debugging and virtual machine technologies were introduced to build a full-level virtual simulation debugging platform for the accelerator vacuum monitoring system. In the early stage of development, parallel collaborative development, full-level virtual debugging and logic rehearsal of the accelerator air monitoring system began to be carried out. Finally, the debugging results were applied to the site through on-site configuration, significantly shortening the time of on-site debugging. Reduce equipment loss and commissioning risk, improve project implementation efficiency and engineering design reliability.

Key words: virtual debugging; Accelerator vacuum monitoring system; Virtual simulation platform

---

*本文系甘肃省自然科学基金（批准号：21JR7RA129），西北师范大学青年教师科研能力提升计划项目（批准号：NWNU-LKQN2021-05）的研究成果之一

0 引 言

大型实验物理加速器装置规模庞大，设备类型繁多，这使得加速器控制系统变得十分复杂。加速器控制系统涉及计算机技术、网络通讯技术、电子学技术及数字信号处理等多项技术，因此控制系统的设计研发是一项复杂的系统工程[1]。加速器控制系统肩负着提供稳定、可靠的粒子束流、保障加速器安全运行的重大使命。

真空系统是加速器系统当中一个重要的子系统，其作用是为粒子束流提供稳定、可靠的真空运行环境。长期以来，加速器真空监控系统的设计与开发都面领着依赖于设备实体的问题。首先，由于加速器本身的复杂性，对工程项目的研制周期、可靠性和安全性的提出了更高的需求。其次，在传统的工程项目实施流程中，系统级的验证、调试工作全部集中在项目后期，一旦发现存在系统性缺陷，将付出很大的代价去完善。此外，目前的设计开发是片段式的、局部的，设计出的程序代码生命周期短、可读性、可移植性差，这些问题使得控制系统设计的可靠性不能得到充分保证。

近年来，虚拟调试技术[2]作为工业 4.0 技术体系中的一个重要支撑技术，广泛应用于自动化产线、汽车制造、航空航天等行业。虚拟调试技术为加速器控制系统的设计开发提供了一种全新的思路。虚拟调试技术是一种基于数字化仿真和模拟的技术，用于在设备研发、安装调试和后期维护阶段实现离线测试，并在实际环境就绪之前将设备调试到最佳状态的过程。长期以来，加速器的设计开发流程是先进行概要设计，然后依次进行机械、电气、控制系统的设计。由于控制系统的调试需要借助输入输出,因此大部分控制系统的调试都要到现场进行。一旦在调试时发现需要改进的缺陷，将回溯到设计阶段，这可能使系统的开发周期延长，无法按时交付。虚拟调试技术通过将现场工况参数迁移到虚拟调试环境中，在虚拟环境下进行各分系统的开发和虚拟调试，在现场调试之前完成绝大部分的调试工作，并将结果应用到后续的现场调试中[3]。通过虚拟调试技术，开发周期中，设计阶段的调试时间将减少 75%左右[4]。传统调试流程与虚拟调试流程的对比如图 1 所示。

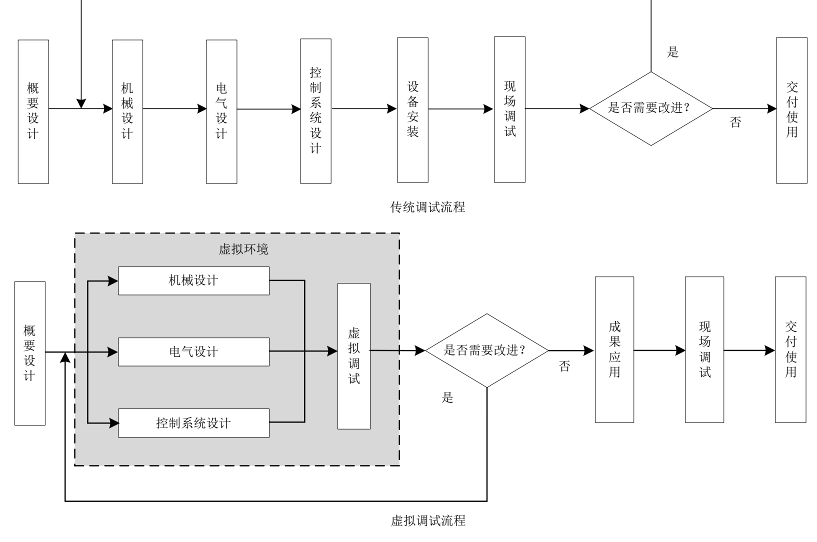


图 1 虚拟调试开发流程对比

虚拟调试技术能显著缩短后续现场调试的时间，降低对设备损耗，减小调试风险，提高项目实施的效率和工程设计的可靠性。通过构建数字化模型，进行控制系统标准化、模块化研究，迭代优化控制系统模型。除了在工程设计开发中的应用，虚拟调试技术还可应用于人员培训、操作预演等，有利于控制系统进行优化和完善。

1　加速器真空监控系统

加速器真空监控系统的目标具体分为三个方面：真空设备的远程控制，即真空阀门（电磁气动插板阀-快关阀）、真空计、分子泵等设备的远程开关；真空状态监测，包括设备的状态监测和管线的真空度监测；实现设备的联锁保护，即当真空监测数值高于阈值时，启动保护逻辑对关键阀门进行插入，同时为其他子系统提供联锁信号，便于其他子系统进行系统级的联锁保护（如高频、功率等）。目前国内外加速器采用的控制系统架构有 SCADA、TANGO、EPICS 等,其中 EPICS 的应用最为广泛[5]。中科院近代物理研究所 CAFe2 直线加速器常温前端真空监控系统采用 EPICS 进行软件系统的集成与开发，为了提升系统性能，优化系统结构，同时提供离线故障分析、逻辑预演及人员培训等服务，引入虚拟化及虚拟调试技术，搭建 CAFe2 虚拟仿真平台，对直线加速器常温前端真空系统进行虚拟设计、开发与全层级系统联调，同时将系统在样机上进行部署与验证。

基于 EPICS 的真空监控系统架构如图 2 所示：设备层(Device Layer)为分布于束线周边的真空设备及仪器仪表，如阀门、真空计、分子泵等，具体真空设备

统计见表 1。现场控制层(Field Control Layer)使用基于 PLC 设备的分布式控制系统，完成对底层设备的过程控制、联锁保护和运行参数的采集、上传[6]。为降低现场布线复杂度和系统维护难度，减少信号传输距离，提高信号质量和可靠性，硬件平台采用基于远程 I/O 的系统架构。包含了一个主站和三个分布式 I/O 模块作为子站, 主站运行控制程序，子站通过 I/O 模块实现数据采集、指令下发。输入输出控制器(Input Output Controller，IOC)是连接操作员接口层(Operator Interface，OPI)和现场设备层的中间件。IOC 的核心是实时数据库，它通过实时数据库实现对现场控制器和真空设备的监控，并将数据传给 OPI 层[7]。OPI 作为客户端与 IOC 服务器进行数据交互，并为用户提供操作和管理现场真空设备的人机界面，包括监控、报警功能等。工程师站与现场控制层直接进行数据交互，便于操作人员完成现场设备组态、逻辑的调整优化以及报警信息和故障的处理。

表 1 真空设备统计信息

设备名称	电气接口	控制节点数量
真空分子泵	RS485/24V 干触点	14
真空计	RS485/232	5
插板阀	24V 干触点	16*3=48

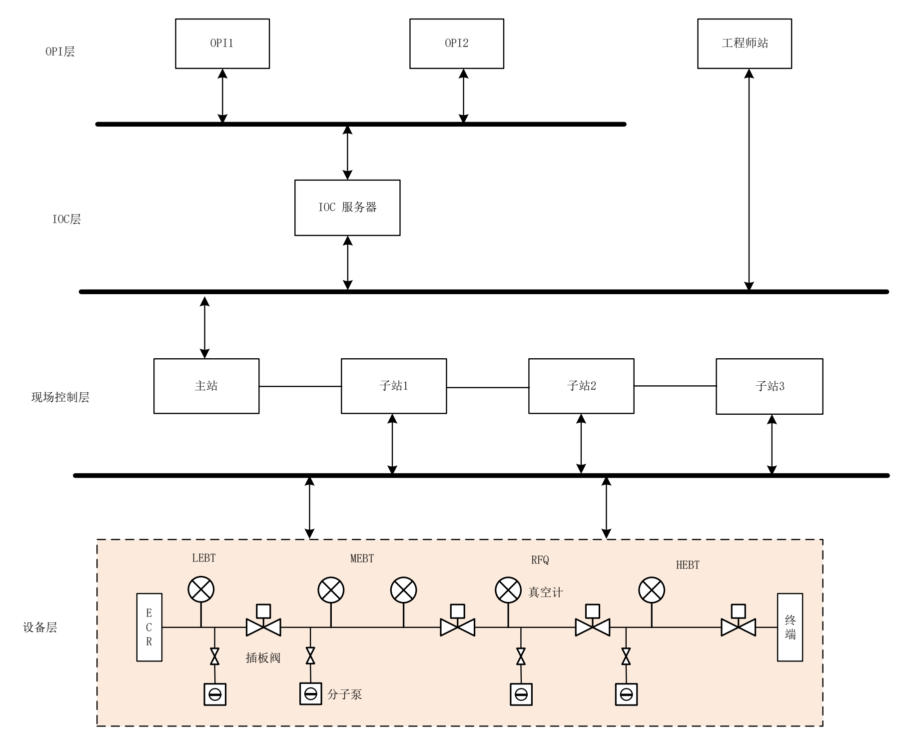


图 2 真空监控系统架构

2 基于虚拟调试的真空监控系统调试方案

通常，控制系统系统的设计、开发、调试需要在现场设备的采购、安装完成之后进行，因此，控制系统的设计开发周期较长，且工程延期的风险较大。虚拟调试技术介入后，整个开发周期将被压缩，控制系统得以更快地交付到现场。首先，现场控制层主要负责现场设备的实时数据采集和设备控制，对实时性要求较高，控制层的设计开发工作对硬件的依赖性较强。现场控制层的开发、调试引入虚拟调试技术，在 PC 机中使用软件模拟真实的 PLC 控制器，通过组态软件完成仿真硬件的组态、配置，控制程序的开发、逻辑验证等。其次，IOC 和 OPI 均是在 Linux 环境中使用 EPICS 的各种开发组件进行设计与开发，其对硬件设施的依赖性较弱。常温前端直线加速器虚拟仿真平台借鉴虚拟化技术[8]，在单台服务器中虚拟多台 OPI 及 IOC 服务器，采用虚拟网卡技术模拟真实的网络通信[9]。虚拟机中运行的操作系统、软件开发环境、网络配置，均与实际系统相同，确保虚拟调试系统与真实控制系统的一致性，同时减少了前期开发对物理设备的投入。

最后，通过局域网将 OPI 与 IOC 的虚拟机系统与虚拟 PLC 的 PC 机进行连接，实现层级间通信、逻辑的测试和验证。验证完成后，仅须在现场进行少量调试工作并将虚拟调试的结果适配到现场设备，真空监控系统的调试方案如图 3 所示。

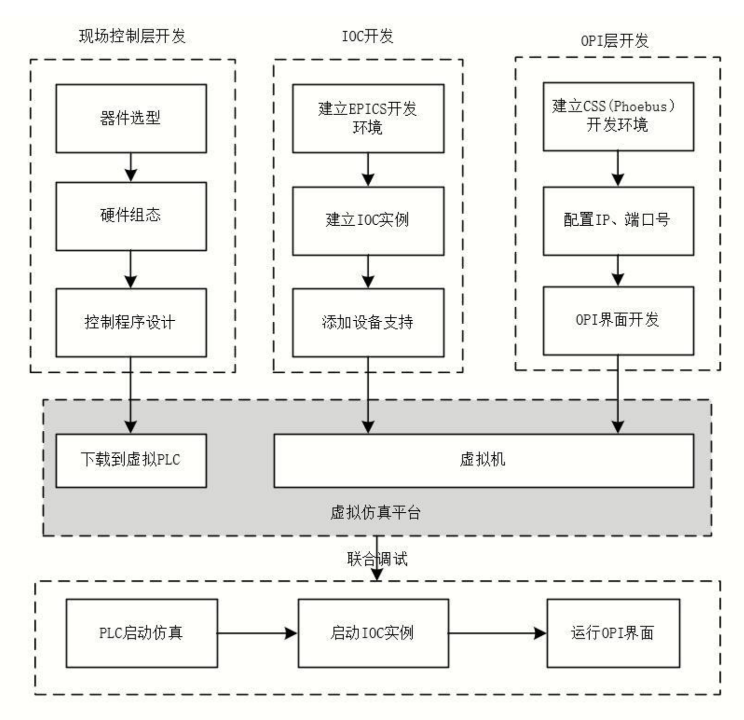


图 3　虚拟调试方案

虚拟仿真平台硬件组成如图 4 所示，采用两台物理机，物理机 1 中使用虚拟机软件分别模拟一个 OPI、IOC 和工程师站。工程师站进行设备组态、程序设计，

并利用虚拟 PLC[10]进行虚拟调试。OPI 运行真空监控系统主界面以及插板阀，分子泵两个子界面。IOC 实现设备集成、协议转换、PV 变量发布。在物理机 2 上使用软件模拟 PLC。当真空监控系统在虚拟仿真平台完成全层级逻辑预演、系统联调及回归测试后，分别将所有程序部署或下载至现场真实的服务器设备及硬件 PLC 中，进行现场调试。

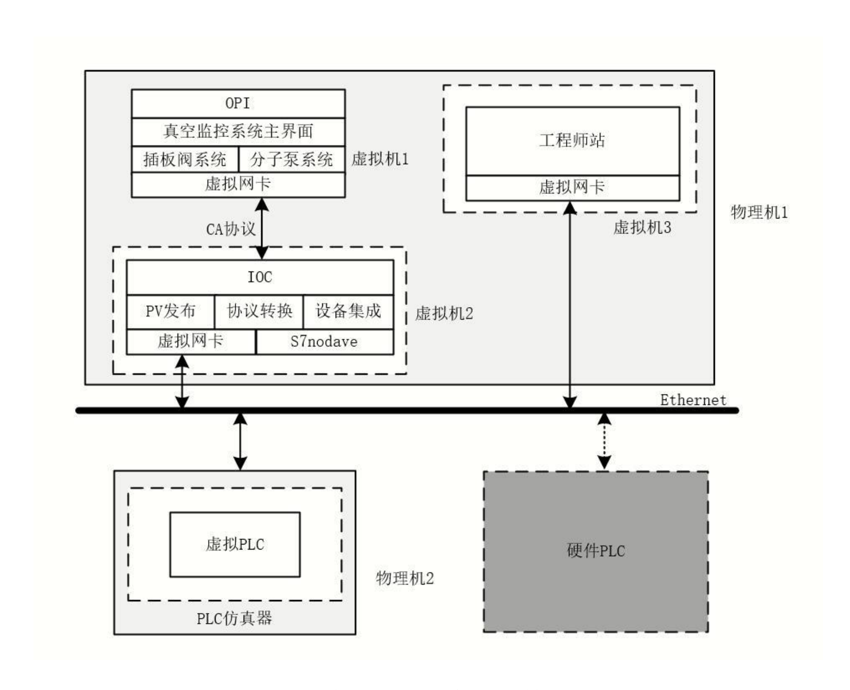


图 4 虚拟调试系统硬件组成

3　基于虚拟调试技术的真空监控系统的设计与开发

3.1　基于虚拟调试技术的控制层开发

3.1.1 系统软、硬件组态

近年来，虚拟调试技术开始在工业控制系统的设计与调试中进行实际应用，虚拟调试技术的使用可使真空监控系统控制层的设计开发摆脱对真实物理实体的依赖。通过基于 PC 机的模拟(Emulate)技术，设计人员在 PC 机的模拟系统上可快速进行控制系统的组态、配置、程序设计及系统测试。由于本系统采用西门子 S7-1500 系列的 CPU、远程 I/O 及通信模块来完成真空设备的远程监测及控制，所以选用西门子 TIA Portal 进行软硬件的组态与程序设计，同时选用西门子高级仿真器 PLCSIM Advanced 进行基于 S7-1500 PLC 控制系统的模拟。PLCSIM Advanced 是以 TIA Portal 为基础的一款高级仿真器，除了可以模拟和验证 PLC 代码，还可以仿真包括通信、知识产权功能块、安全性和 OPC 服务器等功能[2]，

确保了虚拟仿真系统与真实控制系统功能的一致性。

PLCSIM Advanced 提供了一套支持本地通信和分布式通信方式的以太网连接方式，虚拟 PLC 可与真实 PLC、HMI 进行通信，并且为用户预留了第三方接口，虚拟 PLC 可同用户程序或第三方软件进行数据交互。PLCSIM Advanced 创建的虚拟 PLC 的既可与同一台 PC 或虚拟机内的对象通信，也可与在不同的 PC 或虚拟机内的对象进行通信，包含 TCP/IP、西门子 S7 通信、OPC UA 等多种通信方式[11]。

控制层硬件组态如图 5 所示，采用 CPU1513-PN 作为主站，三个 ET-200SP 分布式 I/O 模块作为子站。子站 1 选用了 3 个模拟量输入模块 AI 4xRTD/TC 读取真空计数值。子站 2 选用了 3 个 DI 16x24 V DC 数字量输入模块、1 个 DQ 16x24V DC/0.5A 数字量输出模块用于插板阀状态的监控， 19 个 CM PtP 通信模块用于真空泵、真空计和主站间的通信。子站 3 选用了 28 个模拟量输入模块 AI 4xI,用于获取分子泵和真空计的运行状态。

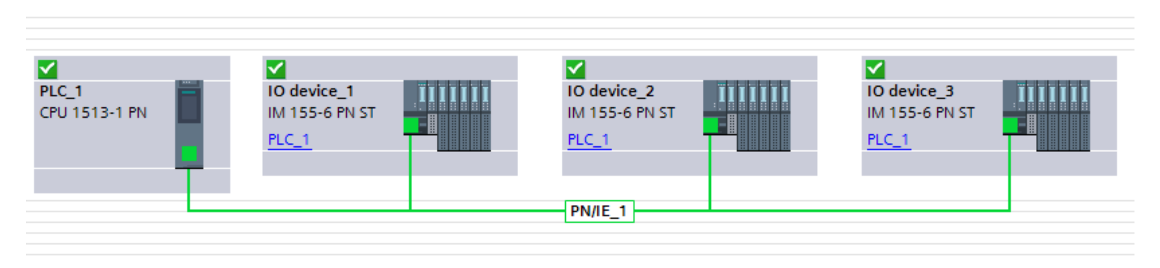


图 5 控制层物理拓扑

3.1.2 PLC 控制程序

如图 6 所示，PLC 控制程序可以实现对设备的自动控制和监测。通过读取设备参数、执行控制指令、监测状态、联锁保护和数据传输等功能，PLC 可以实时获取气动阀、分子泵、真空计等设备的运行参数，并根据预设的逻辑进行判断和运算，实现对设备的自动控制。同时，PLC 还能监测设备通讯状态，触发报警机制，并提供联锁保护功能，确保设备的安全运行。通过实时数据传输，PLC 将设备状态信息传输给加速器真空监控系统，实现对设备的集中管理和监测，提高了设备运行的安全性、可靠性和效率。

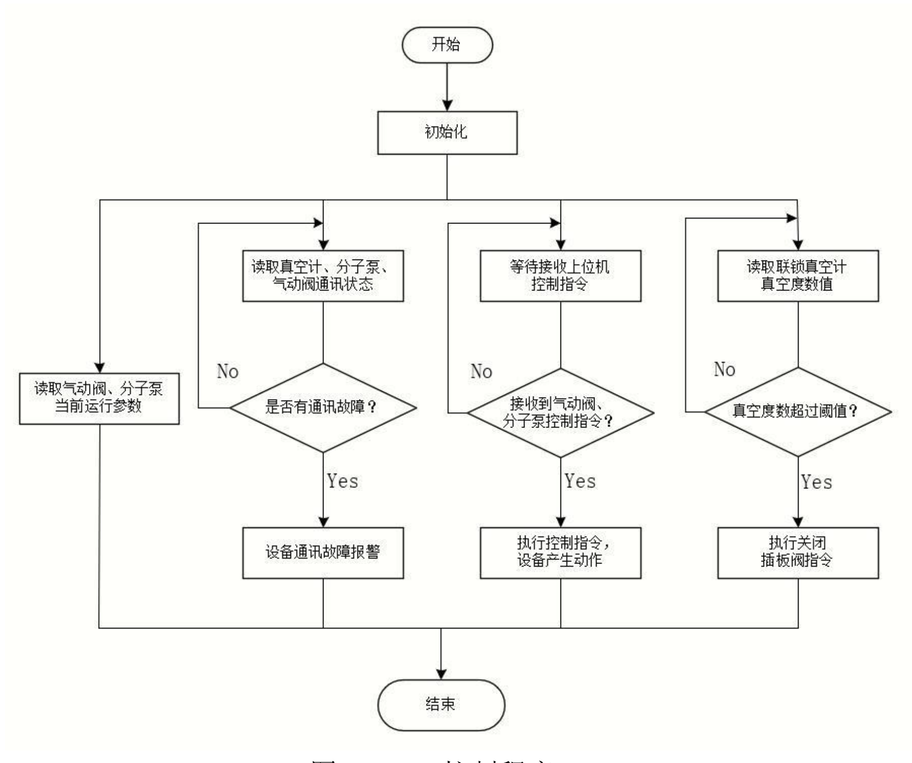


图 6　PLC 控制程序

3.2　虚拟 PLC 与 IOC 通信

PLCSIM Advanced 相比 PLCSIM[12]，具有更强大的功能和更高的灵活性，除进行程序仿真外，还可进行本地通信或分布式通信仿真。PLCSIM Advanced 安装后，将创建一个名为 Siemens PLCSIM Virtual Ethernet Adapter 的虚拟网卡，并且在计算机的物理网卡和虚拟网卡中增加虚拟交换机(PLCSIM Virtual Switch)属性，其作用是使虚拟 PLC 在局域网内与其他设备(如计算机、虚拟 PLC、HMI 等)进行通信。虚拟 PLC 与运行 IOC 的虚拟机 1 之间的通信方式属于分布式通信，需要使用虚拟交换机。因此在进行 IOC 和 PLC 的通信过程中，首先需要在网卡属性选项中激活虚拟交换机功能。随后设置 PG/PC 接口的 S7ONLINE 应用程序访问点为虚拟网卡。PLCSIM Advanced 启用虚拟 PLC 的分布式通信功能时需要将在线访问(Online Access)设定为 PLCSIM Virtual Eth. Adapter,然后选取虚拟 PLC 进行通信的以太网卡，设置虚拟 PLC 的实例名称、IP 地址、子网掩码、PLC 类型，虚拟 PLC 的 IP 地址需要和计算机网卡以及虚拟网卡处于同一网段内[13]，PG/PC 接口和 PLCSIM Advanced 的设置如图 7 所示。

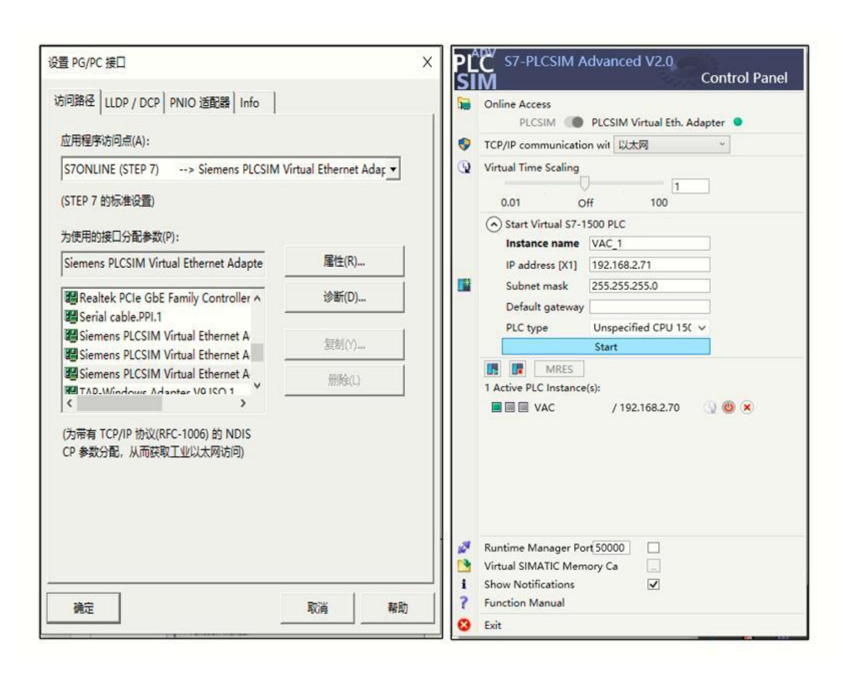


图 7 PG/PC 接口及 PLCSIM Advanced 界面设置

虚拟 PLC 参数配置完成后，即可启动 PLC 的模拟功能，在 TIA Portal 中将程序下载至虚拟 PLC 进行调试的步骤与在真实 PLC 上进行调试相同。如图 8 所示，两台物理机组成局域网进行 TCP/IP 通信，虚拟机 VM2 的网络适配器桥接物理网卡接入虚拟交换机，IOC 获取虚拟 PLC DB 块中变量数值并写入实时数据库中。

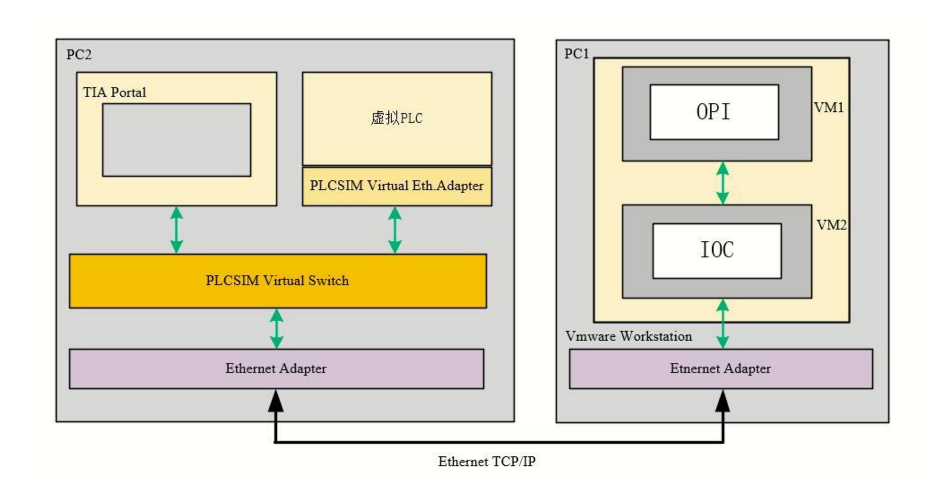


图 8 虚拟 PLC 与 EPICS IOC 通信

3.3 EPICS IOC 和 OPI 设计

目前，虚拟机技术因具有灵活性、安全性、快速部署等特点已经在各种场景得到广泛应用，常见的虚拟机软件有 VMware、KVM 和 Virtualbox 等。本系统在物理机 1 中使用 VMware Workstation 建立了两台虚拟机，用于 IOC 和 OPI 的设

计与开发，其网络设置、软件环境与现场设备一致，采用了 CentOS、64 位 Linux 操作系统。虚拟机 1 中建立了 IOC 的实时数据库、完成了设备支持、驱动程序等模块的开发[14]。虚拟 PLC 采用了与真实 PLC 相同的通信协议，因此采用 s7nodave[15] 组件对虚拟 PLC 添加驱动支持。虚拟机 2 中基于 Phoebus[16]开发的真空系统监控主界面负责监测各节点的真空度、压力以及设备状态，两个子界面完成 17 个阀门和 12 个真空泵的状态显示以及开关功能，如图 9 所示。



图 9 真空监控系统

4 结 论

本项目真空监控系统完成现场安装及线缆敷设前，整个真空监控系统在虚拟仿真环境下完成了全层级的设计、开发、调试及多次回归测试。当现场具备加电及系统测试条件时，通过使用虚拟机移植和工程文件复制等方法，短时间内在现场一次性完成了系统的部署，并通过了系统带电联调，未发生逻辑错误、变量映射不一致等错误，同时避免了因现场调试错误引发设备损毁事故。现场调试过程中出现的问题主要集中在接线质量、安装工艺等方面的问题。工程实践证明：基于虚拟调试技术的系统设计有效地减少了现场调试的时间，能够在短期内快速部署，程序中存在的问题都在虚拟调试环境中完善，降低了现场调试的压力和风险，使得该项目在节约时间、人力成本得到了极大的提高，确保了工程的稳定实施与按期交付。

本项目首次将虚拟调试技术和虚拟化技术结合应用在加速器真空控制系统

的设计中，为控制系统设计提供了一种借鉴方案。基于虚拟仿真系统进行控制系统的设计也存在一定的局限性：由于仿真系统依赖于计算机 CPU 的性能，所以虚拟 PLC 控制器的单次循环时间与真实控制器的单次循环时间不一致。总体来看，本系统的虚拟仿真系统在优化设计流程和提高开发效率方面的优势使其在实际应用中具有广阔的前景。未来的研究将继续探索如何提升仿真系统和真实系统性能的相似度，以便更好服务于加速器控制系统的设计开发。

参考文献

[1] 赵籍九.加速器控制系统及其进展[J].中国物理C,2008(S1):139-141.

[2] 朱国良.数字化双胞胎之虚拟调试技术应用[J].中国仪器仪表,2020(06):19-23.doi: 10.3969/j.issn.1005-2852.2020.06.002

[3] 王位杰.虚拟调试环境的研究[D].重庆：重庆大学,2012:7-9.

[4] 王金江,牛晓彤,黄祖广等.数字孪生驱动的数控机床虚拟调试技术研究[J].制造技术与机床,2022(10):127-132.doi:10.19287/j.mtmt.1005-2402.2022.10.018

[5] 刘小军.基于EPICS的加速器过程控制研究[D].兰州：中国科学院大学(中国科学院近代物理研究所),2021，18-19.

[6] 张德敏,金晓,黎明等.EPICS在加速器控制系统中的应用[J].强激光与粒子束,2008(04):597-600.

[7] 曾孟麒,尹亮,尹聪聪等.基于EPICS的SHINE束线站定时设备控制系统[J].核技术,2023,46(07):25-33.doi: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.070102

[8] 曹凤杰,李慧,汪金满,等.虚拟化技术在油气管道SCADA系统软件测试的应用[J].工业控制计算机,2017,30(12):7-8. doi: 10.3969/j.issn.1001-182X.2017.12.003

[9] 刘强,淡唯,蒋金虎,等.网卡虚拟化综述[J].计算机系统应用,2021,30(12):1-9.doi:10.15888/j.cnki.csa.008245

[10] 赵楸培,孙文丰,廖卓.基于MCD和TIA的翻转机械手虚拟调试系统研究[J].机械工程师,2023(05):5-7+11.

[11] Siemens AG.S7-PLCSIM Advanced Function Manual[M],Germany, Siemens AG,2019:54-61. https://cache.industry.siemens.com/dl/files/484/109773484/att_1004713/v1/s7-plcsim_advanced_function_manual_en-US_en-US.pdf

[12] 徐萍.S7-PLCSIM软件在控制系统中的仿真应用[J].轻金属,2015(09):61-64. doi:10.13662/j.cnki.qjs.2015.09.015.

[13] Daynier Rolando Delgado Sobrino, Roman Ružarovský, Radovan Holubek,et al. Into the early steps of Virtual Commissioning in Tecnomatix Plant Simulation using S7-PLCSIM Advanced and STEP 7 TIA Portal[C]. Modern Technologies in Manufacturing . Cluj-Napoca, Romania: EDP Sciences . 2019:299.doi: 10.1051/matecconf/201929902005

[14] 王广红,何诗英,高格,等.基于EPICS的EAST极向场电源监控设计与实现[J]. 计算机测量与控制,2018,26(06):57-60.doi:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2018.06.015

[15] 朱海君,童金,何子锋,等.基于EPICS的SAPT注入引出远控系统[J].自动化与仪器仪表,2019,(06):1-3+11. doi:10.14016/j.cnki.1001-9227.2019.06.001

[16] 陈鑫.基于Phoebus/Alarms的加速器报警技术研究[D].安徽:中国科学技术大学,2020:11

(通讯作者：曹世权：E-mail: caosq@nwnu.edu.cn)

作者贡献声明：

李继刚，陆彦宏：进行实验，论文起草；

杨锋，陈又新，曹世权：提出研究思路，设计研究方案；

刘海涛，李娇赛：提供系统设计开发技术支持